干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

宁夏河东沙地不同坡度柠条绵鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异

高　阳[1]，韩　磊[1,2,3]，柳利利[1]，王娜娜[1]，彭　苓[4]，周　鹏[4]，展秀丽[1]

(1. 宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川　750021；2. 中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室，宁夏 银川　750021；3. 宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室，宁夏 银川　750021；4. 宁夏大学农学院，宁夏 银川　750021)

摘　要：为探讨全球气候变化背景下多元线性混合模型(IsoSource)和贝叶斯混合模型(MixSIAR)解析宁夏河东沙地柠条绵鸡儿(*Caragana korshinskii*)水分利用策略差异及适用性，利用氢氧稳定同位素技术，结合直接对比法、IsoSource模型和MixSIAR模型对比分析不同坡度(6°、10°、16°和24°)样地柠条绵鸡儿在生长季不同时期对各潜在水源的利用率，并评估两种模型的植物水分溯源效果。结果表明：柠条绵鸡儿对不同土层深度土壤水的利用存在明显的季节性差异，生长季初期，随着坡度的增大，柠条绵鸡儿对中层土壤水的利用率呈现出先增大后减小的趋势；生长季中期，随坡度增大，柠条绵鸡儿主要水分来源由深层土壤转移至浅层土壤；生长季后期，柠条绵鸡儿主要水分来源随着坡度的增大由浅层土壤转移至深层土壤。基于直接对比法的定性判断结果，IsoSource模型和MixSIAR模型计算坡度6°、10°和16°样地柠条锦鸡儿主要水分来源利用率的适用性均较高；而MixSIAR模型计算坡度24°样地柠条绵鸡儿主要的水分来源以及其贡献率具有更高的可靠性。IsoSource模型更适合解析较小坡度(6°和16°)样地柠条绵鸡儿的水分利用策略；而MixSIAR模型解析较大坡度(10°和24°)样地柠条绵鸡儿水分利用策略的适用性更好。研究结果可为我国干旱区植物水分来源鉴别方法的选择提供科学参考。

关 键 词：IsoSource模型；MixSIAR模型；氢氧稳定同位素；水分利用策略；宁夏河东沙地

文章编号：

全球变暖加速了地球系统的水循环，使全球和区域降水格局发生变化[1]。宁夏河东沙地地处毛乌素沙地西南缘，在空间上是我国北方农牧交错区最具过渡性地域特征的沙地，也是黄土高原向鄂尔多斯台地过渡的地带，属于气候变化的敏感区[2]。研究干旱区典型固沙植物的水分利用策略，对评估降水格局变化背景下该地区的生态可持续发展具有重要意义[3]。稳定同位素技术在定量分析植物水分利用策略的相关研究中得到广泛应用[4-6]。研究表明，除极少数盐生、旱生和湿地植物外，陆地植物根系吸收的水分在到达叶片或未栓化的幼嫩枝条之前一般不发生同位素分馏[7]，且各潜在水源之间的氢氧稳定同位素组成存在显著差异。因此，通过比对植物木质部水与潜在水源的稳定同位素组成，可有效辨别和区分植物水分来源[8]。

多元线性混合模型(IsoSource)和贝叶斯混合模型(MixSIAR)被广泛应用于阐明干旱区植物的水分利用策略，但两种方法的量化结果可能存在一定差异[9-10]。曾祥明等[11]在西南喀斯特地区利用MixSIAR模型和IsoSource模型量化刺楸(*Kalopanax septemlobus*)、香椿(*Toona sinensis*)和化香(*Platycarya strobilacea*)的水分来源时，发现MixSIAR模型计算植物对各水源的利用比例适用性高于IsoSource模型；张宇等[12]利用IsoSource模型和MixSIR、MixSIAR

收稿日期：2021-10-26；　**修订日期**：2022-02-22
基金项目：国家自然科学基金项目(31760236,42161013)资助
作者简介：高阳(1994-)，男，硕士研究生，主要从事干旱区生态水文过程与植被恢复等方面的研究. E-mail: gao15121994088@163.com
通讯作者：韩磊(1985-)，男，研究员，主要从事干旱区生态水文过程方面的研究. E-mail: layhan@163.com

模型研究了红瑞木(*Swida alba*)的水分来源，表明MixSIR模型能够更精确地给出红瑞木主要的吸水层位以及对不同深度土层土壤水的吸收利用比例；Wang等[13]利用IsoSource模型和贝叶斯混合模型(SIAR、MixSIR、MixSIAR)研究了黄土高原半干旱地区黄荆(*Vitex negundo*)、细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、白刺花(*Sophora davidii*)的水分来源，发现SIAR、MixSIAR模型比MixSIR模型具有更好的植物水分溯源效果。部分学者利用IsoSource模型对典型固沙植物的水分来源和水分利用特征进行了研究[14-15]，但该模型只是基于质量平衡进行迭代算法，存在未考虑随机测量误差、纳入潜在水源中稳定同位素组成的不确定性等缺点，使得IsoSource模型的量化结果可靠性降低，因此有必要对不同模型的水源区分性能进行对比研究，分析其对解析植物水分利用策略的适用性。

本研究以宁夏河东沙地典型人工固沙植物柠条绵鸡儿为研究对象，利用氢氧稳定同位素技术、直接对比法、IsoSource模型和MixSIAR模型分析生长季不同时期、不同坡度柠条绵鸡儿的水分利用策略差异，评估两种模型计算植物水分来源的适用性，为阐释全球气候变化背景下干旱沙地人工固沙植物水分利用策略提供依据。

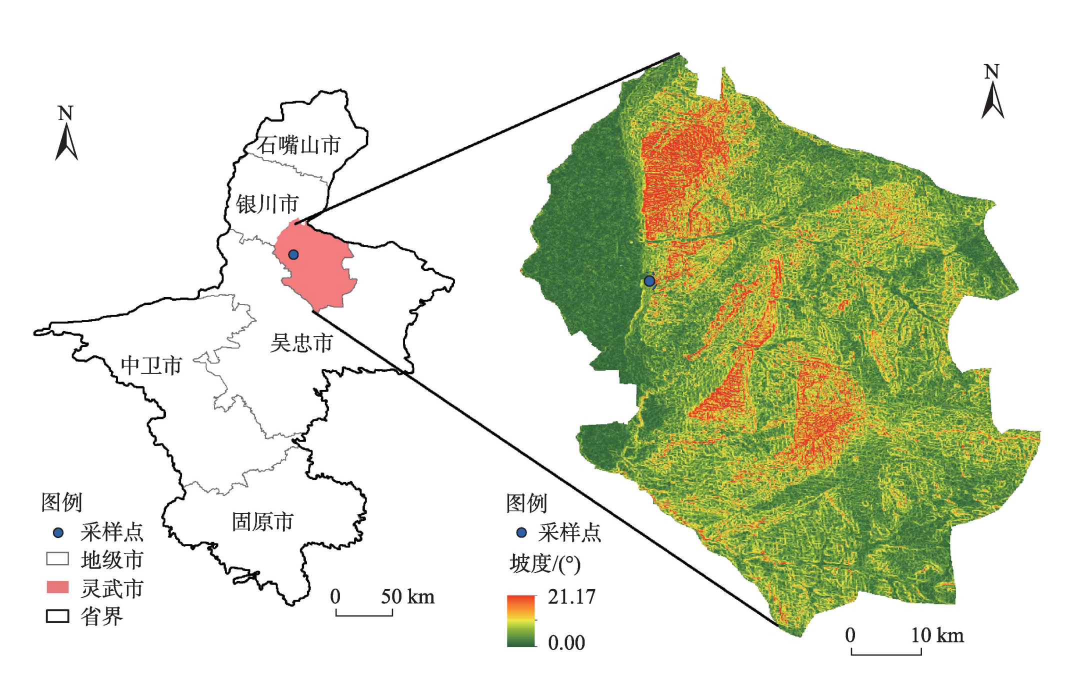
1　研究区概况

试验地位于宁夏回族自治区灵武市白芨滩国家级自然保护区(106°22′03″E，38°03′34″N，海拔1150 m)(图1)，该地区地处毛乌素沙地西南缘，属温带大陆性气候。多年平均气温6.2~8.8 ℃，多年平均降水量198.9 mm，多年平均潜在蒸发量1928.4 mm，降水主要集中在7—9月[16]。人工林树种主要有柠条绵鸡儿、丝棉木(*Euonymus maackii*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、新疆杨(*Populus alba*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和细枝山竹子(*Corethrodendron scoparium*)等。地带性土壤以淡栗钙土、棕钙土和风沙土为主。

2　数据与方法

2.1　样品采集与测定

本研究在柠条绵鸡儿人工林内自然分布的4个坡度(6°、10°、16°和24°)进行研究，每个坡度分别布设3块20 m×20 m的样地，柠条绵鸡儿样地基本情况和土壤基本理化性质分别见表1和表2。2018年5—10月每月分别采集一次植物木质部和土壤样



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the location of the study area

表1　不同坡度柠条绵鸡儿人工林基本情况

Tab. 1　Basic conditions of *Caragana korshinskii* plantations on different slopes

坡度/(°)	树龄/a	平均株高/m	平均冠幅/m	平均地径/cm	株行列距/m
6	3~10	1.87±0.02	2.43×2.19	1.70±0.08	3×4
10	3~10	1.54±0.12	2.46×1.95	1.30±0.23	3×4
16	3~10	1.58±0.11	2.45×2.20	1.30±0.22	3×4
24	3~10	1.15±0.07	2.40×1.95	0.80±0.17	3×4

表2　土壤基本理化性质

Tab. 2　Basic physical and chemical properties of soil

坡度/(°)	容重/g·cm^{-3}	全氮/mg·kg^{-1}	全磷/mg·kg^{-1}	全钾/mg·kg^{-1}	速效磷/mg·kg^{-1}	速效钾/mg·kg^{-1}
6	1.54	0.03±0.01	0.20±0.01	86.65±3.19	47.98±40.97	100.94±27.68
10	1.58	0.07±0.03	0.24±0.02	73.72±10.27	13.17±6.66	106.75±37.18
16	1.54	0.10±0.02	0.19±0.02	62.36±4.22	15.05±8.59	102.82±24.89
24	1.53	0.05±0.02	0.17±0.03	60.51±2.91	7.53±0.37	98.94±8.36

品。在4个坡度样地内分别选取树龄、冠幅相似、地径相近、生长状况良好的3棵植株，用枝剪分别从植株4个方向剪取中部直径约0.5 cm，长约3~5 cm的非绿色栓化小枝，迅速剥除外皮与韧皮部，装入10 mL的玻璃样品瓶中，并用Parafilm封口膜密封后置于随身携带的保温箱(0~5 ℃)中冷藏，每个坡度样地均采集3瓶样品作为重复。同时，在所选柠条绵鸡儿灌丛下方地势相对均一的地点，用土钻按照0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~120 cm、120~160 cm和160~200 cm分层采集土壤样品，每层采集2瓶土样，立即密封在已标记好的样品袋中，放入保温箱中。所有植物木质部和土壤样品带回实验室后放入冰柜(-20 ℃)中冷冻保存直到水分抽提。在无林空旷地内放置3个标准雨量筒(直径20 cm的圆桶上放置漏斗，下端与雨量筒相连，漏斗口放置一个乒乓球，防止降水样品蒸发)收集降水量大于等于0.1 mm的降水样品，每次降水结束，立即将3个标准雨量筒中的降水样品混合后转入10 mL玻璃样品瓶中，并用Parafilm封口膜密封后放入保温箱中带回实验室，置于冰箱(4 ℃)中冷藏保存待测。2018年5—10月，共收集到降水样品34个。利用Vantage Pro 2小型气象站(Davis Inc，USA)，每隔15 min对大气温度、降水量等气象数据进行记录。

利用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100，北京理加联合科技有限公司)抽提土壤水和植物木质部水。所有水样经0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤后，利用基于稳定同位素红外光谱技术的液态水同位素分析仪(T-LWIA-45-EP，ABB-Los Gatos Research，CA)测定降水、土壤水、植物木质部水样品的δD和$\delta^{18}O$组成，δD和$\delta^{18}O$的测量误差分别低于±1‰和±0.3‰。测定结果以相对于维也纳标准平均海洋水(Vienna standard mean ocean water，VSMOW)的千分差值(‰)表示：

$$\delta D(或\delta^{18}O)=\frac{R_{sample}-R_{V-SMOW}}{R_{V-SMOW}}\times 1000‰ \quad (1)$$

式中：R_{sample}和R_{V-SMOW}分别为样品和维也纳标准平均海洋水中的稳定同位素比率(D/H和$^{18}O/^{16}O$)(‰)。

利用低温真空蒸馏法提取植物木质部水时，可能同时蒸馏出与水分子具有相似光谱吸收峰的甲醇和乙醇等有机物质，导致稳定同位素的测量误差超过仪器精度[17]。为减小测量误差，本研究利用Los Gatos的光谱分析软件对植物木质部水的稳定同位素组成进行校正[18-19]。由于柠条绵鸡儿是干旱区常见的旱生植物，而旱生植物的根系在吸收水分的过程中会发生氢稳定同位素分馏[6]，因此，本研究采用氧稳定同位素计算植物的水分来源。

2.2　研究方法

试验地地下水埋深深度为18.0 m，人工固沙植物一般难以吸水和利用地下水，因此，本研究只将不同土层深度的土壤水作为潜在水源。

(1) 多元线性混合模型(IsoSource)

将柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$值作为混合物，不同土层深度的土壤水及其$\delta^{18}O$值作为来源代入模

型，将来源增量设为1%，将质量平衡公差设为0.01‰，得到各潜在水源的平均水分贡献率。

（2）贝叶斯混合模型（MixSIAR）

将柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$值作为混合物数据，各层土壤水$\delta^{18}O$值作为源数据，并将分馏数据设为0，默认不发生氧稳定同位素分馏，Error structure选择Resid Only，马尔卡夫链蒙特卡罗（MCMC）的运行长度设为normal，模型结果使用Gelman-Rubin和Geweke诊断确定MixSIAR模型是否收敛，如果MixSIAR模型不收敛则增加MCMC的运行时长，选择long或者very long，模型输出结果为各潜在水源对应的平均贡献率[10]。

由于目前植物对不同水源的实际利用值无法直接观测[20]，因此，本研究通过评估植物木质部水氧稳定同位素的观测值和预测值之间的匹配程度来间接评估IsoSource模型和MixSIAR模型的性能[13]。将测定的柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$值作为观测值（O_i），预测值（P_i）的计算基于柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$值是各潜在水源混合物的假设[21]。预测值P_i计算如下：

$$P_i=\sum_{i=1}^{n} f_i\delta_A \tag{2}$$

式中：n为植物木质部水的潜在水源个数（n=3）；f_i为IsoSource模型和MixSIAR模型计算植物对第i个潜在水源的利用率（%）；δ_A为各潜在水源的氧稳定同位素值（‰）。

本研究根据不同土层深度土壤水$\delta^{18}O$值的相似性及变化趋势合并相邻土层[22]，将0~200 cm的土壤剖面自上而下依次划分为浅层（0~40 cm）、中层（40~120 cm）和深层（120~200 cm）土壤，各土层土壤水$\delta^{18}O$值取对应深度土壤水$\delta^{18}O$值的几何平均值。本研究采用Microsoft Excel 2019软件进行数据整理，在SPSS 26.0中对不同坡度样地土壤水和柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$值的差异显著性进行单因素方差分析。利用Origin 2018软件进行图像绘制，图表中数据为平均值±标准差。

2.3　模型评价

（1）均方根误差（RMSE）：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2} \tag{3}$$

式中：n为验证样本的数量；O_i和P_i分别为植物木质部水$\delta^{18}O$的观测值和预测值。RMSE越低，表明该模型误差越小，预测结果越准确。

（2）模拟优度指数（G）：

$$G=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{O}-O_i)^2} \tag{4}$$

式中：$\bar{O}$为观测值的平均值。G值越接近1表示模型预测的可靠性越高；G为1表示模型预测非常准确；G值为负值表示模型预测可靠性不高。

（3）平均绝对百分比误差（MAPE）：

$$\mathrm{MAPE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{P_i-O_i}{O_i}\right| \tag{5}$$

MAPE<10%表示高度拟合；10%<MAPE<20%表示良好拟合；20%<MAPE<50%表示可行拟合；MAPE>50%表示不可行拟合。

（4）最大预测误差（MaxE）：

$$\mathrm{MaxE}=\max(P_i-O_i),\quad i=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

（5）最小预测误差（MinE）：

$$\mathrm{MinE}=\min(P_i-O_i),\quad i=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

3　结果与分析

3.1　降水分布及降水中δD和$\delta^{18}O$变化特征

试验地2018年5—10月植物生长季总降水量为172.1 mm，主要集中在7—9月（135.1 mm）（图2），占生长季总降水量的78.5%。降水中δD、$\delta^{18}O$的变化范围分别介于-74.1‰~7.4‰、-10.5‰~0.7‰之间（图2）。对宁夏河东沙地事件尺度降水中δD、$\delta^{18}O$进行线性回归分析，拟合得到局地大气降水线（LMWL：$\delta D=5.12\delta^{18}O-12.53$，$R^2$=0.86，$n$=34）（图3）。LMWL的斜率和截距均小于全球大气降水线（GMWL：$\delta D=8\delta^{18}O+10$）[23-24]，说明雨滴在非饱和大气降落过程中受到了较强烈云下二次蒸发效应的影响，降水中稳定同位素发生不平衡分馏和重同位素富集，使得LMWL的斜率偏小[25]。

3.2　不同坡度柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$变化特征

不同坡度样地柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$差异显著（P<0.05），其中，坡度10°、16°和坡度24°样地柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$随坡度的增大逐渐减小（图4），变化范围分别介于-6.9‰~-2.1‰、-7.7‰~-5.3‰和-5.9‰~-0.4‰，随时间的变化趋势基本一致，生长季初期（5月）值最大，生长季后期（9—10月）值最小；而坡度6°样地柠条绵鸡儿木质部水$\delta^{18}O$的变化范围介于-7.8‰~-5.2‰，生长季后期值最大，生长

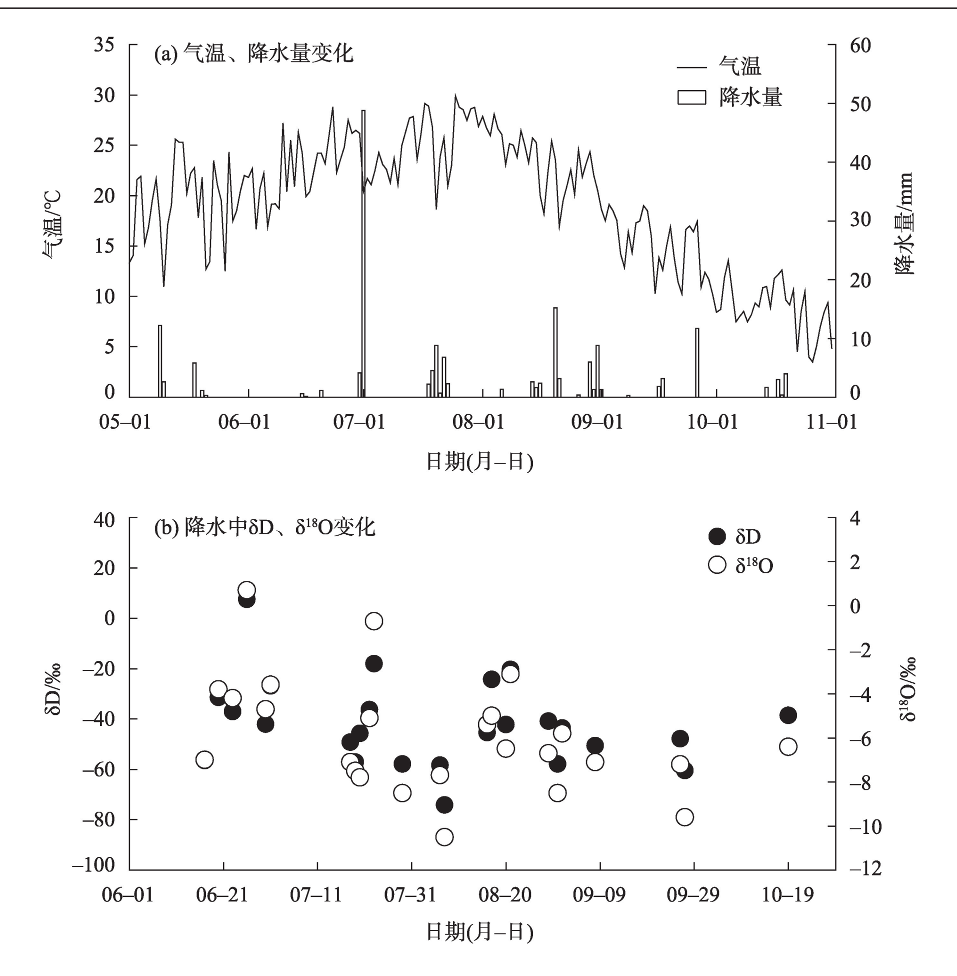
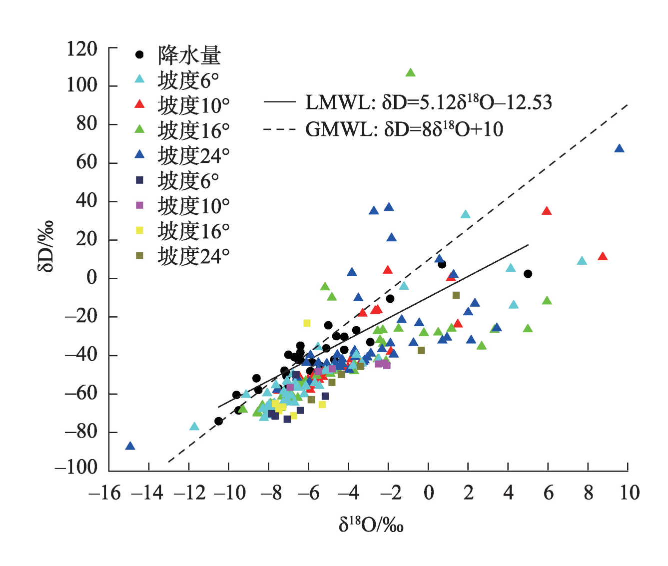


图2 不同时期气温、降水量及降水中δD、$\delta^{18}O$变化

Fig. 2 Variation of temperature, precipitation and δD and $\delta^{18}O$ in precipitation during different periods



注：△为土壤水；□为柠条锦鸡儿木质部水；LMWL为局地大气降水线；GMWL为全球大气降水线。

图3 局地大气降水线及土壤水、柠条锦鸡儿木质部水δD和$\delta^{18}O$变化

Fig. 3 Variation of local meteoric water line and δD and $\delta^{18}O$ in soil water and xylem water of *Caragana korshinskii*

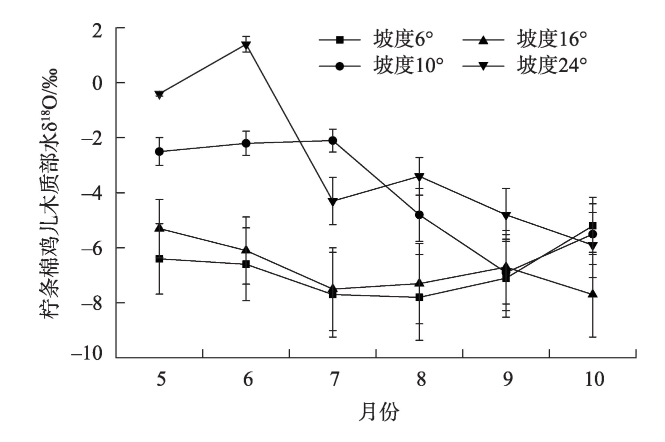


图4 生长季不同坡度柠条锦鸡儿木质部水$\delta^{18}O$变化

Fig. 4 Variation of $\delta^{18}O$ in xylem water of *Caragana korshinskii* at different slopes during the growing season

季中期(6—8月)值最小。

3.3 土壤含水量与土壤水$\delta^{18}O$变化特征

随着坡度的增大，柠条锦鸡儿样地土壤含水量逐渐减小，由坡度6°的(6.30±1.01)%减小到坡度24°的(1.33±0.58)%(图5)。坡度24°样地土壤水$\delta^{18}O$在

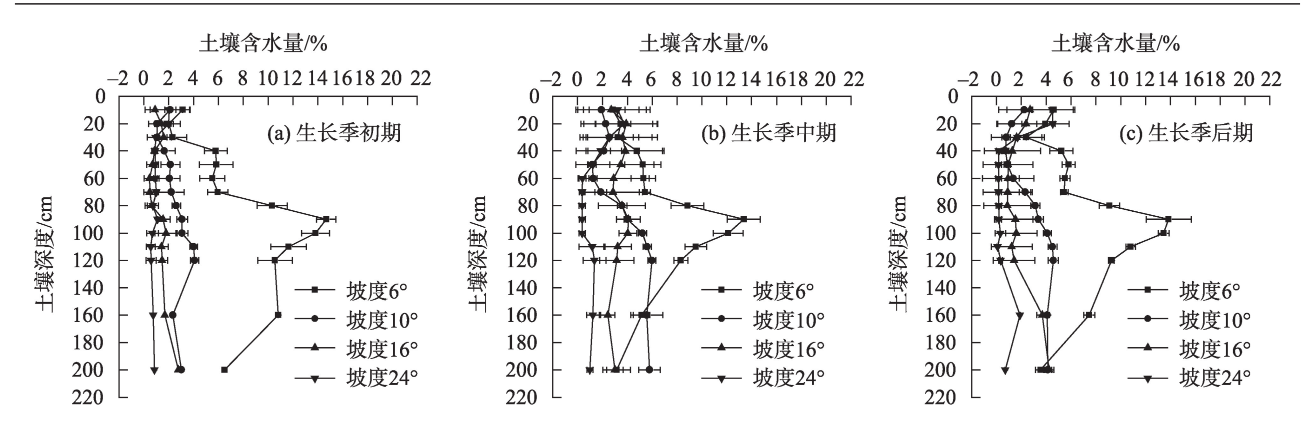


图5　生长季不同坡度土壤含水量变化

Fig. 5　Variation of soil water content at different slopes during the growing season

0~40 cm和40~120 cm土层最高，120~200 cm土层则表现出坡度10°最高、坡度16°最低。不同坡度柠条绵鸡儿样地土壤水δ¹⁸O随土层深度的增加逐渐减小(图6)。

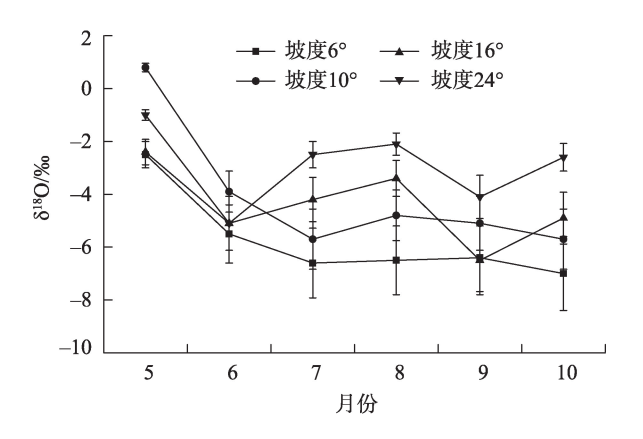


图6　生长季不同坡度土壤水δ¹⁸O变化

Fig. 6　Variation of soil water δ¹⁸O at different slopes during the growing season

3.4　柠条绵鸡儿的主要吸水层位

如图7所示，生长季初期，坡度6°样地柠条绵鸡儿主要利用中层(60~80 cm)、深层(160~180 cm)土壤水，坡度10°样地柠条绵鸡儿主要利用中层(40~60 cm、100~120 cm)、深层(140~160 cm)土壤水，而坡度16°样地柠条绵鸡儿主要利用中层(80~100 cm、120 cm)土壤水，坡度24°样地柠条绵鸡儿的主要吸水层位在60~80 cm土层。生长季中期，随降水量增加，坡度6°样地柠条绵鸡儿与土壤水存在多个交点，利用直接对比法不能判断出水分来源，坡度10°样地柠条绵鸡儿转为以利用浅层和中层土壤水为主，而坡度16°样地柠条绵鸡儿仍主要利用中层和深层土壤水，坡度24°样地柠条绵鸡儿增加了对浅层土壤水的利用，同时坡度24°样地柠条绵鸡儿木质部水δ¹⁸O与中层土壤水存在交点，表明坡度24°坡样地柠条绵鸡儿主要利用浅层和中层土壤水。生长季后期，坡度6°、10°样地柠条绵鸡儿转为以利用浅层(20~40 cm)土壤水为主，而坡度16°、24°样地柠条绵鸡儿转为利用更深层次的土壤水。

3.5　IsoSource模型和MixSIAR模型对植物水分来源定量分析

如图8所示，生长季初期，IsoSource模型和MixSIAR模型计算坡度6°、10°和16°样地柠条绵鸡儿对土壤水利用率的适用性均较高，随坡度增大，IsoSource模型计算的柠条绵鸡儿对中层和深层土壤水的利用率分别高于MixSIAR模型的计算结果23.5%、34.7%和24.4%，而MixSIAR模型计算坡度24°样地柠条绵鸡儿土壤水利用率的适用性更高。生长季中期，IsoSource模型和MixSIAR模型计算坡度10°样地柠条绵鸡儿对浅层和中层土壤水的利用率较为一致(为91%)，但IsoSource模型计算坡度24°样地柠条绵鸡儿对浅层和中层土壤水的总利用率高于MixSIAR模型的计算结果7.6%。生长季后期，坡度6°样地柠条绵鸡儿的主要水源由深层转移至浅层土壤，IsoSource模型计算坡度6°、16°、24°样地柠条绵鸡儿对土壤水利用率的适用性高于MixSIAR模型，坡度16°样地柠条绵鸡儿对深层土壤水的利用率增加至最大(52.4%)，而坡度24°样地柠条绵鸡儿的主要水源由中层转移至深层土壤(73.9%)；坡度10°样地柠条绵鸡儿的主要水源由中层转移至浅层土壤，MixSIAR模型适用性更高，柠条

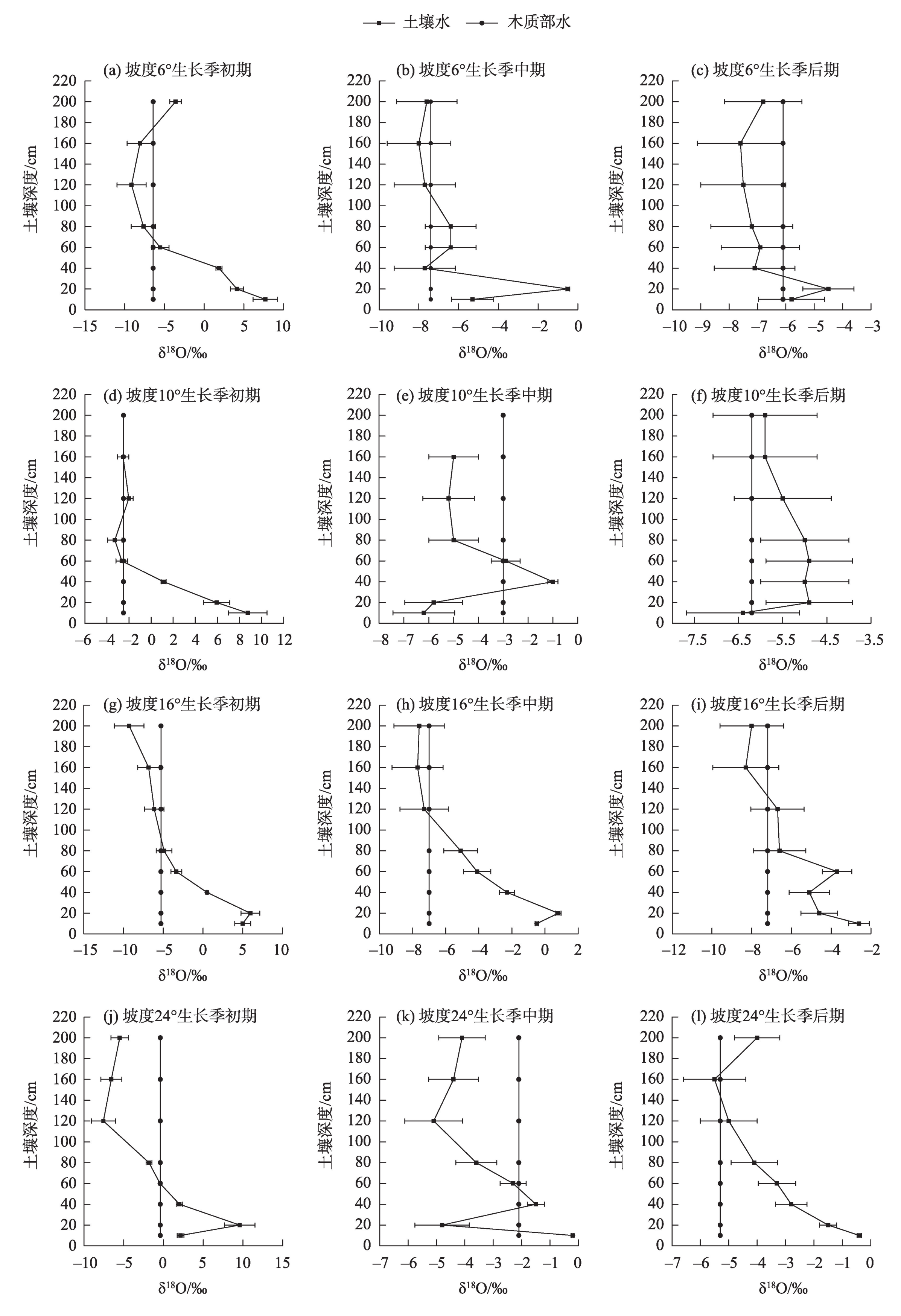


图7 不同坡度柠条绵鸡儿δ18O的水分来源分析

Fig. 7 Analysis of the water source of δ18O in *Caragana korshinskii* at different slopes

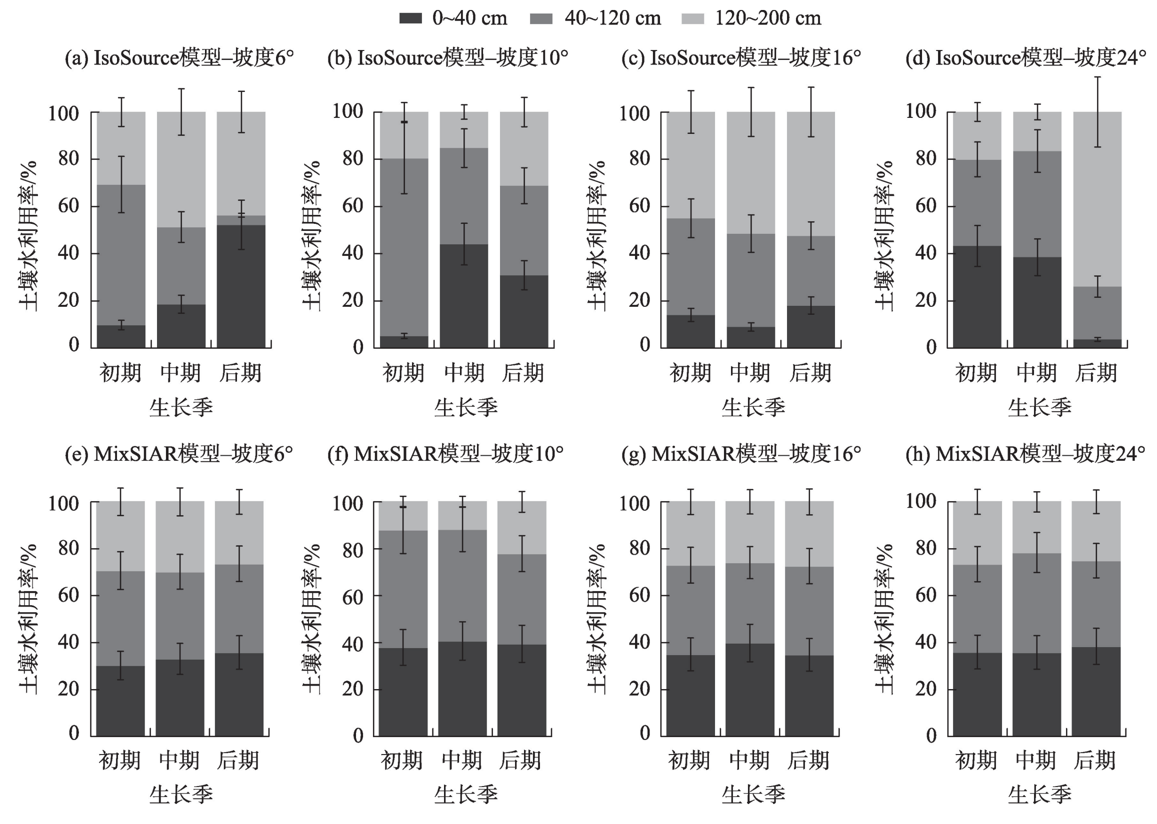


图8　IsoSource模型和MixSIAR模型计算生长季不同坡度柠条绵鸡儿土壤水利用率

Fig. 8　IsoSource model and MixSIAR model for calculating soil water use in *Caragana korshinskii* at different slopes during the growing season

绵鸡儿对浅层土壤水的利用率为38.3%。

3.6　IsoSource模型和MixSIAR模型的植物水分溯源效果

如表3所示，MixSIAR模型在计算坡度10°、16°、24°样地柠条绵鸡儿水分来源时RMSE更小；IsoSource模型计算坡度6°样地柠条绵鸡儿水分来源时RMSE更小。MixSIAR模型计算的坡度6°、16°、24°样地柠条绵鸡儿的*G*为负值，区分水源性能可靠性降低；当坡度为24°时，IsoSource模型的MAPE>50%。IsoSource模型计算坡度6°样地柠条绵鸡儿水分来源时具有更好的植物水分溯源效果；MixSIAR模型计算坡度10°样地柠条绵鸡儿水分来源的溯源效果更好；计算较大坡度柠条绵鸡儿水分来源时，IsoSource模型的准确性低于MixSIAR模型。

4　讨　论

坡度、坡向等地形条件对地表光、热、水资源具有再分配作用，进而影响林地根系的生长和分布[26-27]，而植物的根系分布特征决定植物的水分利用策略[28]。

表3　IsoSource模型和MixSIAR模型的预测性能

Tab. 3　Predictive performance of IsoSource model and MixSIAR model

评价指标	坡度6°		坡度10°		坡度16°		坡度24°	
	IsoSource模型	MixSIAR模型	IsoSource模型	MixSIAR模型	IsoSource模型	MixSIAR模型	IsoSource模型	MixSIAR模型
RMSE	0.00002	0.00157	0.00155	0.00087	0.00258	0.00002	0.00310	0.00004
G	0.9997	−2.1632	0.1060	0.7645	0.9996	−8.2986	0.9998	−1.2755
MAPE	0.0015	0.2036	0.0591	0.4094	0.0020	0.3396	1.3147	0.0245
MaxE	0.0031	0.0007	0.0029	0.0016	0.0038	0.0017	0.0034	0.0013
MinE	−0.0017	−0.0007	−0.0017	−0.0016	0.0001	0.0001	−0.0062	0.0070

注：RMSE为均方根误差；*G*为模拟优度指数；MAPE为平均绝对百分比误差；MaxE为最大预测误差；MinE为最小预测误差。

已有研究[14]表明，随着坡度的增大，细根根系参数的最大值由中深层土壤向浅层土壤转移，呈现出表聚现象，并且随土层深度的增加，细根的根长密度、根表面积密度等根系参数与土壤水分和养分的变化趋势基本一致，呈递减趋势。在整个生长季，柠条绵鸡儿根据土壤含水量的相对高低，在不同土层间灵活转换主要水分来源。生长季初期，柠条绵鸡儿对中层土壤水利用率随坡度增大呈先增后减趋势；生长季中期，柠条绵鸡儿的主要水分来源随坡度的增大向浅层土壤转移，主要利用浅层和中层土壤水；生长季后期，柠条绵鸡儿主要水分来源随坡度的增大向深层土壤转移，吸收利用深层土壤水。这可能与柠条绵鸡儿具有二态性根系结构有关[29]。朱雅娟等[30]对乌兰布和沙漠柠条锦鸡儿的研究也表明，柠条锦鸡儿在不同季节分别利用浅层和较深层的土壤水分，推测其可能具有双型根系。生长季初期，柠条绵鸡儿需水量少，水分来源单一；而生长季中期，一方面，降水补给土壤水作用明显，土壤含水量显著增加，植物利用浅层和中层土壤水消耗的能量相对较小[31]，另一方面，土壤水分和养分含量供给充足，细根数量显著增加，柠条绵鸡儿优先利用浅层土壤水[27]；生长季后期，柠条绵鸡儿吸收利用深层土壤水这一稳定性水源，说明柠条绵鸡儿采取了资源依赖型的水分利用策略[32]。

IsoSource模型和MixSIAR模型在量化植物水分来源上存在一定差异[11]。IsoSource模型和MixSIAR模型解析坡度6°、10°和16°样地柠条绵鸡儿主要水分来源利用比例的适用性较高。然而这两种模型在计算坡度24°样地柠条绵鸡儿主要水分来源利用比例时存在一定差异，因此借助直接对比法的定性判断结果发现，MixSIAR模型解析坡度24°样地柠条绵鸡儿主要水分来源利用比例的适用性高于IsoSource模型。曾祥明等[11]通过直接相关法判断植物主要吸水源来衡量IsoSource模型和MixSIAR模型的适用性，结果也表明利用MixSIAR模型计算植物对各水源的利用比例适用性高于IsoSource模型。同时根据模型性能评价结果，IsoSource模型和MixSIAR模型分别计算坡度6°、10°样地柠条绵鸡儿水分来源时具有更好的植物水分溯源效果；而在计算坡度16°、24°样地柠条绵鸡儿水分来源时，IsoSource模型的准确性低于MixSIAR模型。因此本研究认为IsoSource模型更适合解析较小坡度（6°和16°）样地柠条绵鸡儿的水分利用策略；而MixSIAR模型解析较大坡度（10°和24°）样地柠条绵鸡儿水分利用策略的适用性更好。Wang等[13]利用RMSE、G、R、MaxE和MinE模型性能评价指标对IsoSource模型和3种贝叶斯混合模型（SIAR、MixSIR、MixSIAR）的水源分配性能进行了对比评价，同样发现IsoSource模型的预测虽然准确，但该模型的性能不稳定，而SIAR模型和MixSIAR模型比MixSIR模型具有更好的植物水分溯源效果，可能是由于后验分布仿真算法的不同造成了这种差异。

IsoSource模型被广泛运用于解析植物水分来源，但该模型只是基于稳定同位素质量守恒定律，未明确纳入水源中同位素组成的不确定性[9]。而MixSIAR模型是基于MixSIR模型和SIAR模型的优点所做的改进，通过考虑源值、分类和连续协变量和先验信息的不确定性来改进更简单的线性混合模型，以提高模型结果的准确性[11]。同时MixSIAR模型提供了一个最优解，而不是可行解的范围[10]。本研究中坡度6°、10°、16°样地柠条绵鸡儿木质部水及不同土层深度土壤水同位素组成的空间差异性较小，即使IsoSource模型计算时未考虑植物木质部水及不同土层深度土壤水同位素组成的空间差异性，该模型计算结果的可信度也较高，因此两种模型均适用且计算结果的不确定性较小；而坡度24°样地柠条绵鸡儿木质部水及不同土层深度土壤水同位素组成的空间差异性较大，使得IsoSource模型在计算坡度24°样地柠条绵鸡儿主要水分来源利用比例时标准差较大，增加了该模型计算坡度24°样地柠条绵鸡儿主要水分来源利用比例的不确定性。MixSIAR模型解决了IsoSource模型计算时未考虑植物木质部水和各潜在水源稳定同位素组成空间差异性的问题[8]，其计算结果的标准差显著低于IsoSource模型计算结果的标准差，有效降低了该模型计算结果的不确定性，即MixSIAR模型的计算结果能更精确的给出坡度24°样地柠条绵鸡儿主要的水分来源以及对不同土层深度土壤水的利用比例，这与张宇等[12]的研究结果一致。李楠[33]研究也发现，SIAR模型计算的各水源贡献率的标准差明显低于IsoSource模型计算结果的标准差。本研究进行了IsoSource模型和MixSIAR模型植物水分溯源效果的对比研究，并选择出了更适合解析干旱区不同坡度样地植物水分来源的溯源模型，解答了研究者

在研究干旱区植物水分来源时，应该选择哪种溯源模型的困惑。

5 结 论

(1) 柠条绵鸡儿对不同土层深度土壤水的利用存在明显的季节性差异，生长季初期，随着坡度的增大，柠条绵鸡儿对主要水分来源的利用率呈现出先增后减趋势；生长季中期，柠条绵鸡儿主要水分来源随坡度的增大由深变浅；而生长季后期，柠条绵鸡儿主要水分来源随坡度增大由浅变深，呈相反的变化趋势。

(2) IsoSource模型更适合解析较小坡度(6°和16°)样地柠条绵鸡儿的水分利用策略；而MixSIAR模型解析较大坡度(10°和24°)样地柠条绵鸡儿水分利用策略的适用性更好。

参考文献(References)

[1] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041. [Ding Yihui, Wang Huijun. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(10): 1029-1041.]

[2] 黄晓宇, 韩永贵, 韩磊. 宁夏河东沙区人工林土壤水分时空变化及其与气象因子之间的关系[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(5): 29-34. [Huang Xiaoyu, Han Yonggui, Han Lei. Temporal and spatial variation of soil moisture in artificial forests in Hedong sandy area and its relationship with meteorological factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(5): 29-34.]

[3] 陈亚鹏, 周洪华, 朱成刚. 塔里木河下游胡杨水分传输过程研究综述[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 612-619. [Chen Yapeng, Zhou Honghua, Zhu Chenggang. A review of water transport processes of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 612-619.]

[4] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 276: 55-63.

[5] White J C, Smith W K. Water source utilization under differing surface flow regimes in the riparian species *Liquidambar styraciflua*, in the southern Appalachian Foothills, USA[J]. Plant Ecology: An International Journal, 2020, 221(11): 1069-1082.

[6] Jia G D, Liu Z Q, Chen L X, et al. Distinguish water utilization strategies of trees growing on Earth-Rocky Mountainous area with transpiration and water isotopes[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(24): 10640-10651.

[7] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 507-559.

[8] Dawson T E, Ehleringer J R. Streamside trees that do not use stream water[J]. Nature, 1991, 350(6316): 335-337.

[9] Phillips D L, Newsome S D, Gregg J W, et al. Combining sources in stable isotope mixing models: Alternative methods[J]. Oecologia, 2005, 144(4): 520-527.

[10] Stock B C, Jackson A L, Ward E J, et al. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models[J]. PeerJ, 2018, 6(4): e5096, doi: 10.7717/peerj.5096.

[11] 曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 等. MixSIAR和IsoSource模型解析植物水分来源的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5611-5619. [Zeng Xiangming, Xu Xianli, Zhong Feixia, et al. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611-5619.]

[12] 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1356-1368. [Zhang Yu, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1356-1368.]

[13] Wang J, Lu N, Fu B J. Inter-comparison of stable isotope mixing models for determining plant water source partitioning[J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 685-693.

[14] 黄晓宇. 基于稳定同位素技术的宁夏河东沙地柠条水分利用策略研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2020. [Huang Xiaoyu. Study on water use strategies of *Caragana korshinskii* in Ningxia Hedong Sandy Land based on stable isotope technology[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.]

[15] 朱林, 祁亚淑, 许兴. 宁夏盐池不同坡位旱地紫苜蓿水分来源[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1226-1240. [Zhu Lin, Qi Yashu, Xu Xing. Water sources of *Medicago sativa* grown in different slope positions in Yanchi County of Ningxia[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1226-1240.]

[16] 展秀丽, 杨晨阳, 韩磊. 宁夏河东沙区防沙治沙区表层土壤有机质和土壤水分空间异质性[J]. 草地学报, 2015, 23(6): 1178-1181. [Zhan Xiuli, Yang Chenyang, Han Lei. Spatial heterogeneity of soil organic matter and soil moisture of topsoil at desertification combating areas of sandy lands in east of Yellow River in Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(6): 1178-1181.]

[17] West A G, Patrickson S J, Ehleringer J R. Water extraction times for plant and soil materials used in stable isotope analysis[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2006, 20(8): 1317-1321.

[18] 刘文茹, 彭新华, 沈业杰, 等. 激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1181-1186. [Liu Wenru, Peng Xinhua, Shen Yejie, et al. Measurements of hydrogen and oxygen isotopes in liquid water by isotope

ratio infrared spectroscopy (IRIS) and their spectral contamination corrections[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1181-1186.]

[19] 孟宪菁, 温学发, 张心昱, 等. 有机物对红外光谱技术测定植物叶片和茎秆水$\delta^{18}O$和δD的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1359-1365. [Meng Xianjing, Wen Xuefa, Zhang Xinyu, et al. Potential impacts of organic contaminant on $\delta^{18}O$ and δD in leaf and xylem water detected by isotope ratio infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(10): 1359-1365.]

[20] Rothfuss Y, Javaux M. Reviews and syntheses: Isotopic approaches to quantify root water uptake: A review and comparison of methods[J]. Biogeosciences, 2017, 14: 2199-2224.

[21] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(9): 1073-1082.

[22] 刘自强, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京土石山区典型植物水分来源[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2135-2142. [Liu Ziqiang, Yu Xinxiao, Jia Guodong, et al. Water source of typical plants in rocky mountain area of Beijing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2135-2142.]

[23] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.

[24] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

[25] 高阳, 韩磊, 韩永贵, 等. 银川平原降水氢氧稳定同位素时间尺度效应及水汽来源[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 91-102. [Gao Yang, Han Lei, Han Yonggui, et al. Time scale effect of hydrogen and oxygen stable isotopes in precipitation and source of water vapor in Yinchuan Plain[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 2022, 45(1): 91-102.]

[26] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 土壤, 2011, 43(4): 515-524. [Wang Shufang, Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon in upstream watershed of Miyun Reservoir in north China[J]. Soils, 2011, 43(4): 515-524.]

[27] 李浩, 胡婵娟, 赵荣钦, 等. 黄土丘陵区典型人工林的根系分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1420-1428. [Li Hao, Hu Chanjuan, Zhao Rongqin, et al. Root distribution characteristics of three typical plantations in a Loess Hills Region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1420-1428.]

[28] 郝帅, 李发东. 艾比湖流域典型荒漠植被水分利用来源研究[J]. 地理学报, 2021, 76(7): 1649-1661. [Hao Shuai, Li Fadong. Water sources of the typical desert vegetation in Ebinur Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1649-1661.]

[29] Zhang Y, Zhang M J, Qu D Y, et al. Water use strategies of dominant species (*Caragana korshinskii* and *Reaumuria soongorica*) in natural shrubs based on stable isotopes in the Loess Hill, China[J]. Water, 2020, 12(7): 1923, doi: 10.3390/w12071923.

[30] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 等. 乌兰布和沙漠5种灌木的水分利用策略[J]. 林业科学, 2010, 46(4): 15-21. [Zhu Yajuan, Jia Zhiqing, Lu Qi, et al. Water use strategy of five shrubs in Ulanbuh Desert[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(4): 15-21.]

[31] 裴艳武, 黄来明, 李荣磊, 等. 毛乌素沙地东南缘人工林樟子松根系吸水来源与影响因素[J/OL]. 土壤学报. [2022-02-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210723.1523.002.html. [Pei Yanwu, Huang Laiming, Li Ronglei, et al. Root water source of *Pinus sylvestris* and influencing factors in the southeastern part of Mu Us Sandy Land, China[J]. Acta Pedologica Sinica. [2022-02-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210723.1523.002.html.]

[32] 朱雅娟, 崔清国, 杜娟, 等. 毛乌素沙地三种灌木群落的水分利用过程[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4470-4478. [Zhu Yajuan, Cui Qingguo, Du Juan, et al. Water use of three shrub communities in Mu Us Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4470-4478.]

[33] 李楠. 基于稳定氧同位素的黄土丘陵区不同树龄枣树土壤水分利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. [Li Nan. Characteristics of soil water utilization in jujube plantation of different stand ages on Loess Plateau of China based on stable oxygen isotope[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2018.]

Differences in water use strategies of *Caragana korshinskii* at different slopes in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia

GAO Yang[1], HAN Lei[1,2,3], LIU Lili[1], WANG Nana[1], PENG Ling[4], ZHOU Peng[4], ZHAN Xiuli[1]

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Joint International Research Laboratory of China-Arab Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: We investigated the differences and applicability of IsoSource and MixSIAR models in resolving the water use strategies of *Caragana korshinskii* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region, China. Under the context of global climate change, we used IsoSource and MixSIAR models to analyze the use of each potential water source by *Caragana korshinskii* on different slopes (6°, 10°, 16°, and 24°) during different periods of the growing season. We then applied hydrogen-oxygen stable isotope technique and direct comparison method to evaluate the effectiveness of both models for plant water traceability. The results showed seasonal differences in the use of soil water by *Caragana korshinskii* at different soil depths. With the increasing slope, the use of soil water by *Caragana korshinskii* in the middle layer first increased and then decreased at the beginning of the growing season. In the middle of the growing season, the main source of water for *Caragana korshinskii* shifted from deep to shallow soils. Later in the growing season, the main source of water for *Caragana korshinskii* shifted from shallow to deep soils. On the basis of the qualitative results of the direct comparison method, both models were applicable for calculating the utilization rate of the main water source of *Caragana korshinskii* in the small sites on 6°, 10°, and 16° samples. The MixSIAR model was more reliable than the IsoSource model in calculating the main water source of *Caragana korshinskii* and its contribution rate on the large slope samples. Therefore, the IsoSource model was suitable for analyzing the water use strategies of *Caragana korshinskii* on small slope (6° and 16°) samples, whereas the MixSIAR model was suitable for analyzing the water use strategies of *Caragana korshinskii* on large slope (10° and 24°) samples. The results of this study provide a scientific reference for the selection of methods to identify plant water sources in arid zones in China.

Key words: IsoSource model; MixSIAR model; stable isotope; water use strategy; east sandy land of the Yellow River in Ningxia